

Mikael Bragge

Ajoneuvon sähköhybridimuunnoksen mitoitus ja optimointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Insinöörityö

2.4.2015

Tekijä(t) Otsikko	Mikael Bragge Ajoneuvon sähköhybridimuunnoksen mitoitus ja optimointi
Sivumäärä Aika	22 sivua + 1 liite 2.4.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Autosähkötekniikka
Ohjaaja(t)	Lehtori Markku Lavi
<p>Vaihtoehtoisten energialähteiden yleistymisen ajoneuvokäytössä on varsin hidasta, joten tähän apuun tulevat hybridiajoneuvot, joiden avulla voidaan hyödyntää vanhaa turvallista tekniikkaa ja saada lisähyötyä uusista vaihtoehtoisista energialähteistä.</p> <p>Tämän työn tavoitteena on luoda pohja Neptunus-planeettavaihdetta käyttävien ajoneuvojen ja muiden koneiden voimalinjan mitoitukselle esittelemällä esimerkkiprojektin ja sen voimalinjan mitoittamisessa käytetyt yhtälöt. Tällä planeettavaihteistolla saadaan aikaiseksi voimalinja, joka tuo mahdollisuuden välityssuhteiden muuttamiseksi ajon aikana täysin portaattomasti.</p> <p>Työn tarkoituksena on selvittää esimerkkiprojektin voimalinjaan vaaditut muutokset, jotta seuravan kehitysversion teho- ja vääntöreservi on riittävä ajoneuvon käyttötarkoitus huomioiden molemmilla voimanlähteillä. Tässä keskitytään sähkökoneiden ja säätöakselin jarrun mitoittamiseen.</p>	
Avainsanat	Hybridi, sähköhybridi, mönkijä

Author(s) Title	Mikael Bragge Electric-hybrid Vehicle Conversion, Matching and Optimization
Number of Pages Date	22 pages + 1 appendix 2 April 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Vehicle and Transport Engineering
Specialisation option	Vehicle Electronics Engineering
Instructor(s)	Markku Lavi, Senior Lecturer
<p>With the slow rate of adaptation of new alternative energy sources in vehicles, hybrid systems have increased in popularity, by having the old well understood technology with most of the gains from new alternative energy sources in the same vehicle.</p> <p>The objective of this thesis was to create a basic template for calculating required values for projects using the Neptunus planetary gear. This was accomplished by using an example project and the equations used in calculating the values needed for the powertrain in the project. The Neptunus planetary gear makes it possible to create a powertrain with constantly variable transmission rates.</p> <p>The goal of this thesis was to calculate the required changes into the powertrain of the example project, in order to achieve best torque and power characteristics for a future version of the project while taking into account the desired use case of the vehicle with both power sources. In this the focus was in calculating the desired values for electric motors and for the braking device of adjusting shaft.</p>	
Keywords	Hybrid, electric-hybrid, ATV

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Hybridivaihtoehdot	2
2.1	Valmiit kaupalliset ratkaisut	2
2.2	Metropolian sähköhybridimönkijäprojekti	2
3	Järjestelmän osat	4
3.1	Voimansiirron komponentit	4
3.2	Sähkömoottori	9
3.3	Generaattori	11
3.4	Akusto	12
3.5	Säätöakselin jarru	12
3.6	Vetoteho	12
4	Hitausmassat ja välityssuhteet	14
5	Simulointimalli ja saadut tulokset	19
6	Yhteenveto	22
	Lähteet	23
	Liitteet	
	Liite 1. Voimalinjan kytkentäkaavio	

1 Johdanto

Hybridiajoneuvot eli kahdella tai useammalla eri voimanlähteellä varustetut ajoneuvot ovat jo osa nykypäivän arkea. Tämä näkyy hyvin henkilöautoissa, mutta jo muutamat pienkoneetkin ovat ottaneet tämän rakenteen omakseen. Hybridijärjestelmillä pyritään saamaan suurin hyöty kustakin voimanlähteestä. Esimerkiksi diesel-sähköhybridillä haetaan diesel polttoaineella edullisia kilometrejä pitkillä matkoilla ja lisätään ajoneuvon käytösädettä, kun taas sähköllä voidaan ajaa hiljaisilla nopeuksilla taajamissa saastuttamatta ja säästää käyttökustannuksissa energian takaisinkierrätyksellä jarrutuksissa.

Portaattomasti toimivan vaihteiston ansiosta voidaan esimerkiksi käyttää polttomoottoria jatkuvasti parhaimman hyötysuhteen käyntinopeusalueella ja säätää ajoneuvon nopeutta sähköisen voimansiirtolinjan avulla, jolloin polttoainekustannuksia voidaan pienentää, kun kokonaishyötysuhde kasvaa.

Tämän työn tavoitteena on Neptunus-planeettavaihteella toteutetun split hybrid -järjestelmän komponenttien mitoittaminen ja optimointi. Esimerkkinä käytetään Metropolian CDIO-projektina toteutettua sähköhybridimönkijää ja kaikki laskuesimerkit ovat laitteessa käytettyjen komponenttien pohjalta luotuja. Kaavojen soveltaminen muihin järjestelmiin on varsin yksinkertaista, eikä vaadi suuria muutoksia perusrakenteisiin tätä varten luodussa Excel-laskentapohjassa. Hitausmomenttien redusoinnissa ja planeettapyörästön suunnittelussa on turvauduttu Airila ym. Koneenosien suunnittelu -teokseen (1).

2 Hybridivaihtoehdot

2.1 Valmiit kaupalliset ratkaisut

Valmiit kaupalliset hybridivoimalinjaratkaisut pienkonepuolella puuttuvat lähes kokonaan. Lähes kaikki bensiini- tai dieselmoottorilla toimivat koneet ovat saaneet korkeintaan sähkökäyttöisen version mallisarjan lisukkeeksi.

Eräs poikkeus kuitenkin löytyy Bad Boy Buggies Inc. -yhtiön valikoimasta; Ambush iS-sarjan mönkijä on varustettu kaasukäyttöisen polttomoottorin lisäksi sähkömoottoreilla. Erikoista ratkaisussa on kuitenkin voimalinja: polttomoottorilta saatava teho syötetään suoraan taka-akselille ja sähkömoottoreilta etuakselille. Ajoneuvo tarjoaa kuitenkin mahdollisuuden akkujen lataamiseen ajon aikana polttomoottorin avulla, jolloin sen toiminta voidaan rinnastaa sarjahybridiksi.

2.2 Metropolian sähköhybridimönkijäprojekti

Vuonna 2012 alkoi CDIO-projekti, johon osallistui alustavasti yhdeksän opiskelijaa AT10- ja AS10-ryhmistä. Projektin tavoitteena oli muuntaa polttomoottorilla toimiva mönkijä sähköhybridiksi lisäämällä siihen planeettavaihteisto ja sähkökäyttö. BRP Finland Oy toimitti projektia varten CAN-AM Outlander MAX -mönkijän, joka purettiin osiin ja siihen istutettiin tarvittavat komponentit. Vuoden 2013 lopulla projekti annettiin yhdelle sähkötekniikan opiskelijalle jatkokehitystä varten ja laite saatettiin ajokuntoon vuoden 2014 keväällä.

Mönkijä pohjautuu samaan ideaan kuin aikaisemmin diplomityönä toteutettu hydraulihybridimönkijä (2). Järjestelmää on yksinkertaistettu runsaasti, kun on siirrytty kokonaan sähköiseen voimalinjaan hydraulisen sijaan.

Mönkijän hybridijärjestelmä on split hybrid-tyyppinen, eli siinä on kaksi toisistaan erillistä voimalinjaa, mekaaninen ja sähköinen. Suoraan polttomoottorin kampiakselin ja vaihteiston sisääntuloakselin väliin sijoitetun CVT-vaihteiston tilalle sijoitettu Neptunus-planeettavaihteisto yhdessä säätöakselin jarrun (jäljempänä jarru) ja kahden sähkömoottorin kanssa muodostavat hybridilaitteiston ytimen. Laitteisto voidaan lukita erillisen jarrun

avulla planeettavaihteen säätöakselista, jolloin saadaan kiinteä mekaaninen välitys polttomoottorin ja ulostulon välille. Tämä mahdollistaa polttomoottorin käynnistämisen liikkeessä ilman erillistä käynnistinmoottoria. Ajoneuvon ollessa paikallaan ja jarrun avoimena voidaan käyttää generaattoria toimittamaan käynnistinmoottorin virkaa.

Muunnoksen suurimmat toiminnalliset epäkohdat johtuvat valmiiksi valituista osista, joita käytettiin mekaniikan toimivuuden todistamiseen kiinteässä moottoritestipenkissä. Tästä johtuen monet komponentit ovat täysin mitoittamattomia ja varsinaisen ajoneuvon ominaisuudet eivät täysin vastaa toivottua.

3 Järjestelmän osat

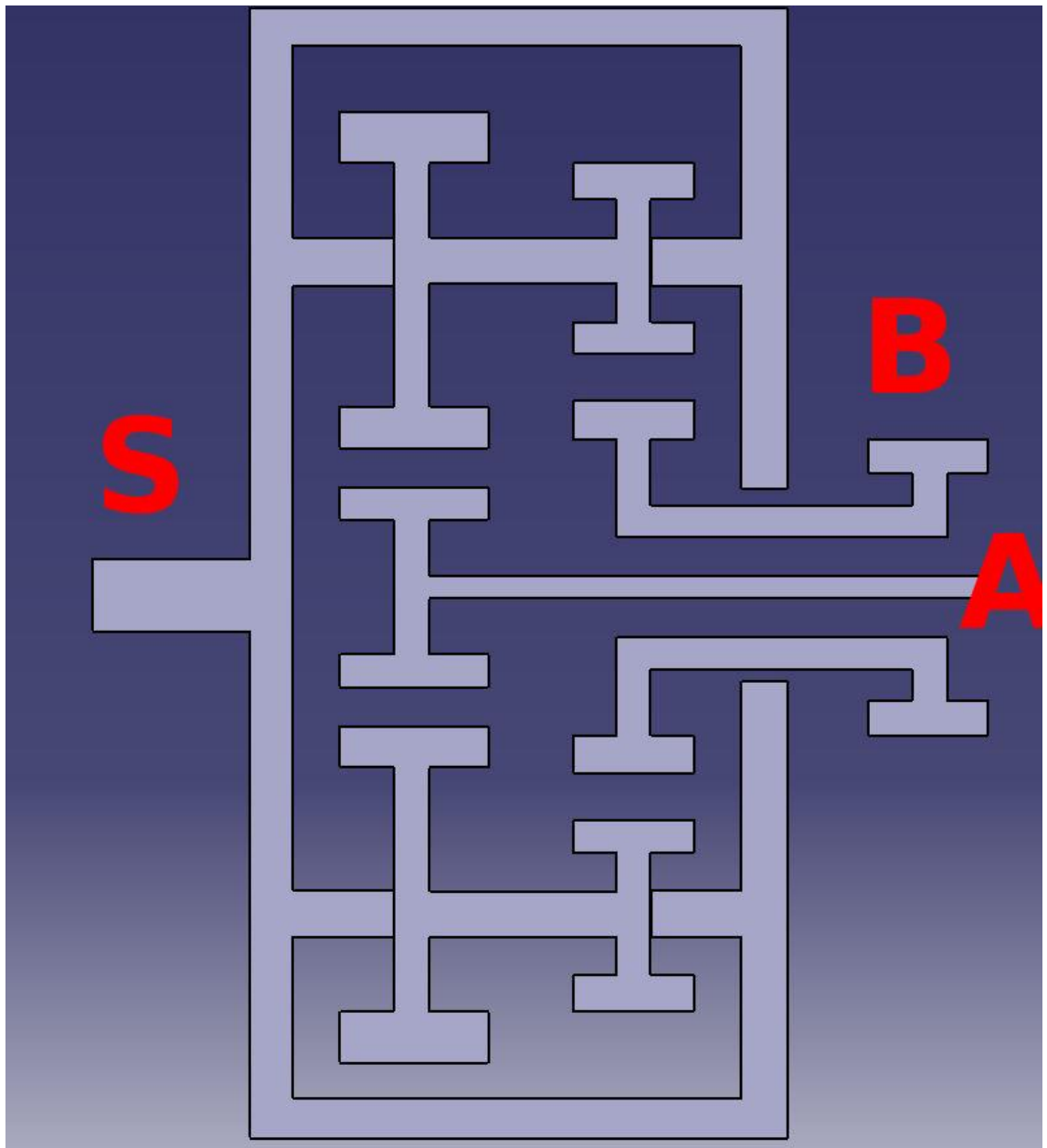
3.1 Voimansiirron komponentit

Järjestelmään mitoitetaan tarvittavan kokoinen jarru, generaattori, sähkömoottori ja akusto. Ajoneuvon polttomoottori, massa, vetokyky ja haluttu kiihtyvyys vaikuttavat näihin arvoihin.

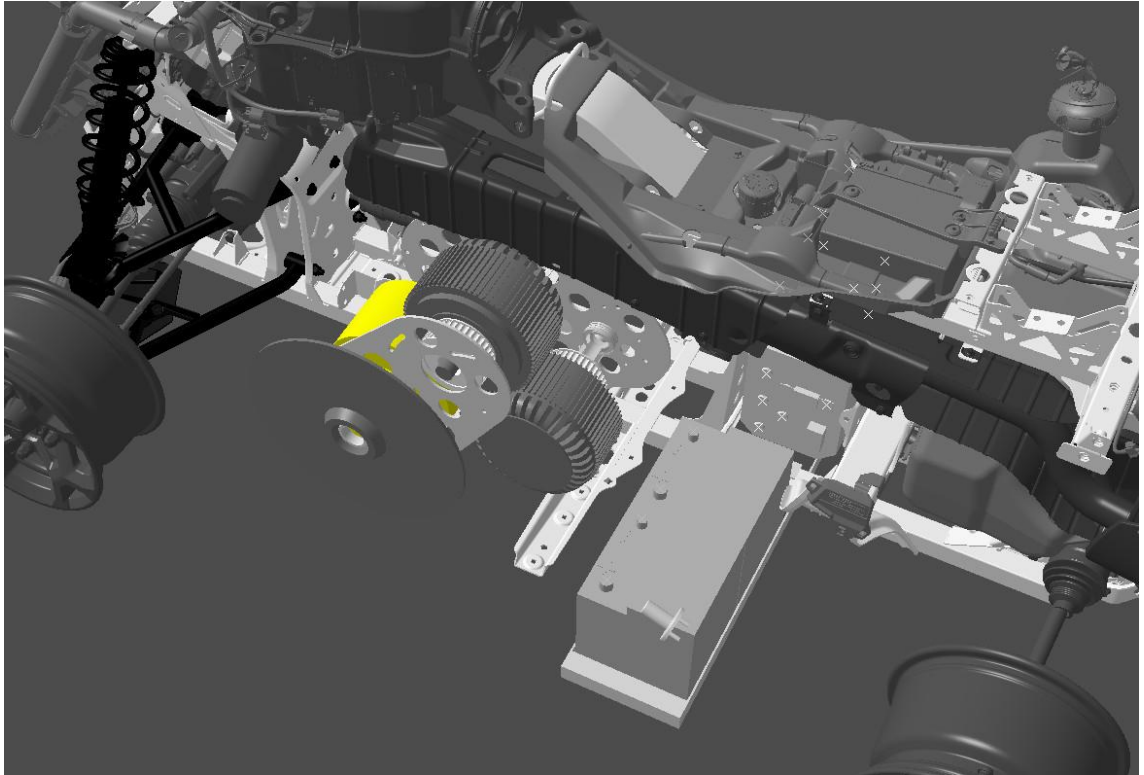
CVT-vaihteiston korvaava Neptunus-planeettavaihte on esitelty kuvassa 1 ja sen sisäinen rakenne kuvassa 2. Neptunus-planeettavaihteen sijainti on esitetty kuvassa 3. A-akseli toimii sisääntulona ja on kytketty suoraan polttomoottorin kampiakseliin. B-akseli toimii ulostulona ja on kytketty sähkömoottoriin. S-akseli toimii säätöakselina ja on kytketty generaattoriin ja jarruun.



Kuva 1. Neptunus-planeettavaihte

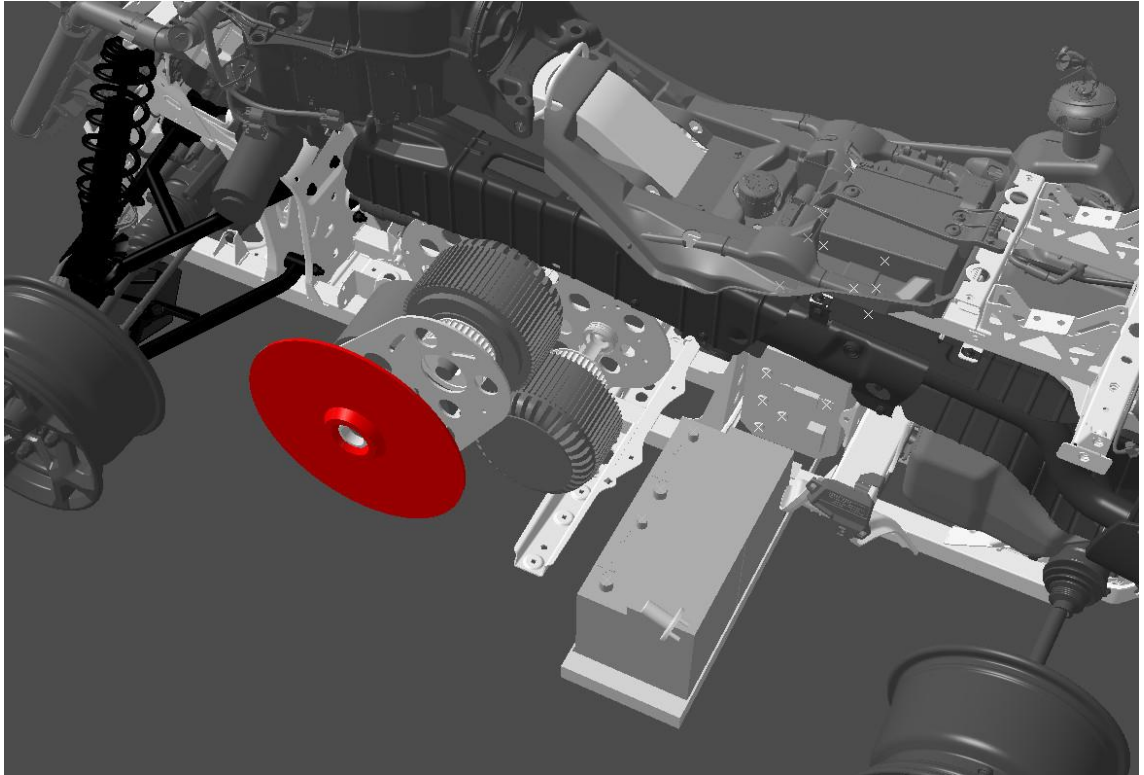


Kuva 2. Neptunus-planeettavaihteen sisäinen rakenne



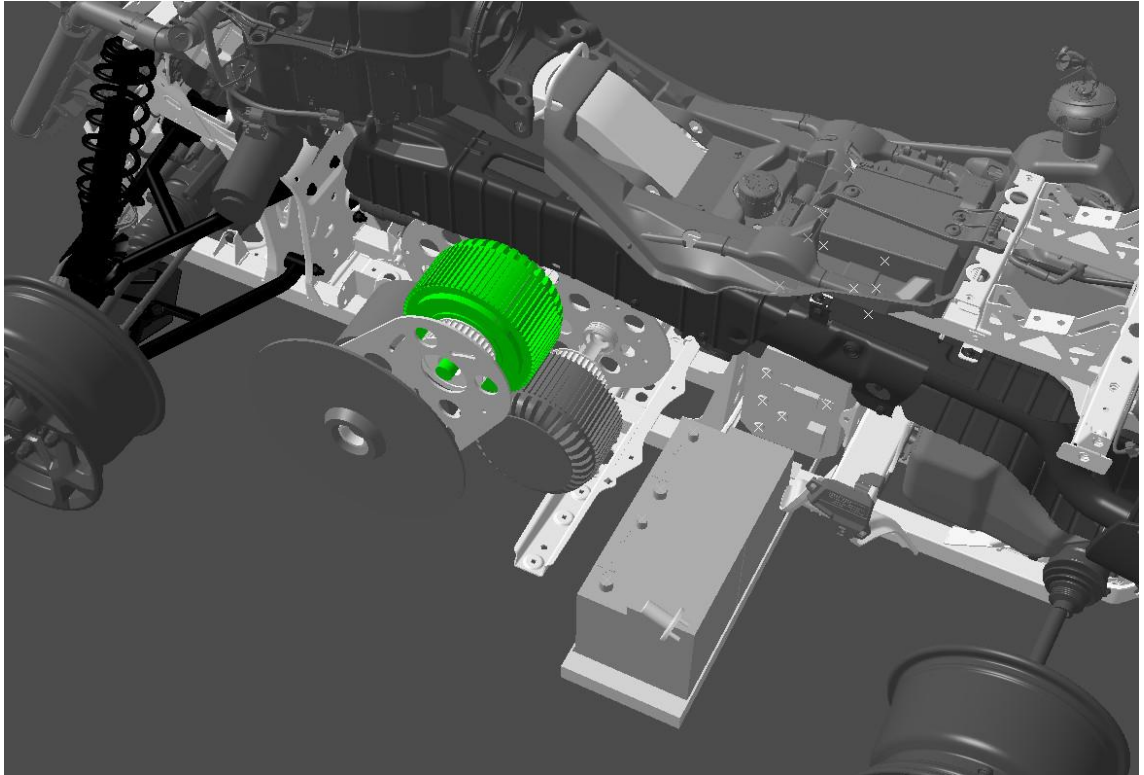
Kuva 3. Neptunus-planeettavaihteen sijainti

Jarrun tehtävänä on lukita säätöakseli S, kun halutaan ajaa moottorin teho suoraan vaihteistolle kiinteään välityssuhteen kautta. Jarru ja sen sijainti laitteistossa on esitetty kuvassa 4. Esimerkkikokoonpanon jarru on valmis ajoneuvokäyttöön tarkoitettu levyjarru, jossa jarrusatulan mäntiä ohjataan erillisellä sähkömoottorilla.



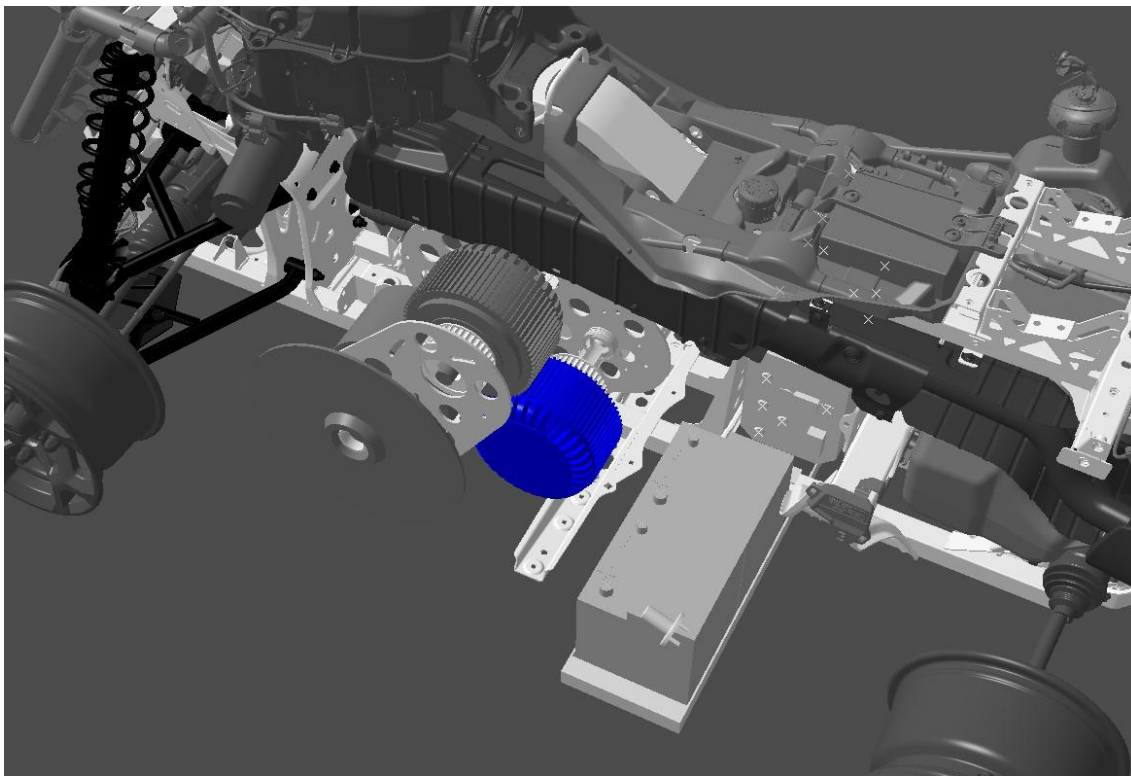
Kuva 4. Säätöakselin jarrun sijainti

Generaattorin tehtävänä on siirtää ylimääräinen teho akustolle sekä sähkömoottorille ja samalla muuttaa säätöakselin S nopeutta ja suuntaa tarvittaessa. Generaattori ja sen sijainti on esitetty kuvassa 5. Esimerkkikokoonpanon generaattorina käytetään Golden Motor Companyn valmistamaa HPM5000B moottoria, jonka ilmoitettu nimellisteho on 5 kW ja nimellisvääntö 14 Nm (3).



Kuva 5. Generaattorin sijainti

Sähkömoottorin tehtävänä on siirtää akustolta sekä generaattorilta saatava teho suoraan vaihteistolle tarpeen mukaan. Sähkömoottori ja sen sijainti on esitetty kuvassa 6. Esimerkkikokoonpanon sähkömoottori on identtinen generaattorin kanssa.



Kuva 6. Sähkömoottorin sijainti

Esimerkkikokoonpanon generaattorin ja sähkömoottorin ohjaukseen käytettävät taajuusmuuttajat ovat myös Golden Motor Companyn valmistamia, ja näitä ohjataan erillisellä jännitesignaalilla ohjausyksiköltä. Taajuusmuuttajat ovat yhdistetty varokkeen ja pääkytkimen kautta akustoon, joka koostuu neljästä sarjaan kytketystä ajoneuvokäyttöön tarkoitetusta lyijyakusta, joiden nimelliskapasiteetti on 45 Ah.

3.2 Sähkömoottori

Sähkömoottorin tehtävänä on siirtää akustoon varattua energiaa mekaaniseen voimansiirtolinjaan. Sähkömoottori on tarkoitettu käytettäväksi niissä tilanteissa, joissa polttomoottori ei ole käytännöllinen, esimerkiksi siirtymiin alueilla, joilla melu ja päästöt ovat ongelma. Koska moottori on kytketty suoraan vaihteistoon, tulee sen kestää läpi koko kierrosalueen, jolla polttomoottorikin toimii vaihteiston sisääntulossa katsottuna. Tätä voidaan tosin muokata erillisellä välityksellä, jos sopivaa moottoria ei löydetä.

Valintakriteerit sähkömoottorille ovat kulmanopeus kytkentäakselilla ajoneuvon maksiminopeudella ($\omega_M @ v_{max}$) sekä tarvittu vääntömomentti suurimman halutun kiihtyvyyden saavuttamiseksi. Akuston jännite ja sähkömoottorin kanssa käytettävän taajuusmuuttajan ominaisuudet ovat myös olennainen osa valintaa tehtäessä.

Kun tunnetaan ajoneuvon suurin tarvittava kiihtyvyys a_{max} , ajoneuvon massa m ja järjestelmän hitausmomentit, saadaan sähkömoottorin vääntömomentti:

$$M_m = \frac{M_{pyörä}}{i_{vaihtH} i_{vet} \eta_{tot}} + J_{totMH} \alpha_m = \frac{m a_{max} r_{dyn}}{i_{vaihtH} i_{vet} \eta_{vaiht} \eta_{vet}} + J_{totMH} \frac{a_{max} i_{vaihtH} i_{vet}}{r_{dyn}} \quad (1)$$

jossa $M_{pyörä}$ on vääntömomentti vetävillä pyörillä,

η_{tot} voimalinjan kokonaishyötysuhde vetäville pyörille,

α_m kulmakiihtyvyys sähkömoottorin akselilla,

r_{dyn} pyörän dynaaminen säde,

η_{vaiht} vaihteiston hyötysuhde,

η_{vet} vetopyörästä hyötysuhde ja

J_{totMH} yhtälöstä 17.

Sähkömoottorin suurin tarvittava kulmanopeus saadaan selville, kun tunnetaan ajoneuvon maksiminopeus $v_{max} [\frac{m}{s}]$. Nopeuden tulisi olla sähkömoottorin käyttöalueen suurin nopeus, mutta koska sähkömoottori on suoraan kytketty akselistoon, tulee sen kestää aina polttomoottorin aikaansaaman ajonopeuden tuottamalle kulmanopeudelle asti. Sähkömoottorin ilmoitetun maksiminopeuden ylittämisestä aiheutuvat mekaaniset ja sähköiset ongelmat jätetään kuitenkin tässä työssä käsittelemättä.

Näin ollen suurin tarvittava kulmanopeus on

$$\omega_{max} = i_{vaihtH} i_{vet} \frac{v_{max}}{r_{dyn}} \quad (2)$$

3.3 Generaattori

Generaattorin tehtävänä on siirtää ylimääräinen teho akustolle sekä sähkömoottorille ja samalla muuttaa säätöakselin S nopeutta ja suuntaa tarvittaessa. Jotta generaattori kykenisi muuttamaan säätöakselin suuntaa, tarvitaan sille suurempi momentti kuin millä akselia toisesta päästä käytetään.

Kun halutaan siirtyä käyttämään polttomoottoria pelkän sähkömoottorin sijaan, tulee generaattorin jarruttaa säätöakselia, jotta se saadaan mahdollisimman lähelle nollanopeutta, jotta lukitseminen jarrulla olisi vaivatonta. Kussakin tilanteessa vaadittava momentti on

$$M_G = \frac{M_P}{i_{SG}i_{aS}^{-1}} + J_{Gred}\alpha_G = \frac{M_P}{i_{SG}i_{aS}^{-1}} + J_{Gred}\frac{\Delta\omega}{t} \quad (3)$$

missä M_P on polttomoottorin tuottama momentti,

α_G haluttu kulmahidastuvuus,

$\Delta\omega$ akselin kulmanopeuden muutos,

t pysähtymiseen kuluva aika ja

J_{Gred} yhtälöstä 21.

Tästä voidaan laskea myös tarvittava teho generaattorille, mikä on

$$P_G = M_G\omega \quad (4)$$

missä ω on generaattorin akselin kulmanopeus.

Generaattorin tulee kestää kulmanopeus ω_{max} , joka on peräisin polttomoottorilta, kun ajoneuvo on paikallaan ja sähkömoottorilta kun ajoneuvo liikkuu. Tähän pätevät yhtälöt

$$\omega_{max} = \frac{\omega_{Pmax}}{i_{aS}i_G} \quad (5)$$

$$\omega_{max} = \frac{\omega_{Mmax}}{i_{Sb}^{-1}i_{bv}^{-1}} = i_{Sb}i_{bv}\omega_{Mmax} \quad (6)$$

joissa ω_{Pmax} on polttomoottorin tuottama suurin kulmanopeus ja

ω_{Mmax} on sähkömoottorin tuottama suurin kulmanopeus.

Mitoituksessa käytetään suurempaa arvoa yhtälöiden antamista tuloksista.

3.4 Akusto

Esimerkkikokoonpanon akustona toimivat neljä sarjaan kytkettyä 45 Ah:n lyijyhyytelöakua takaavat ajoneuvolle testien perusteella noin 30 min ajoaikaa pelkällä sähköllä. Tätä noin 2 kWh:n energiamäärää voidaan pitää ohjearvona akuston mitoittamiselle, kun tunnetaan haluttu ajoaika. Tässä työssä perehdytään mekaaniseen toteutukseen, joten akustoa ei mitoiteta uudelleen.

3.5 Sääto akselin jarru

Esimerkkikokoonpanossa käytettävä levyjarru saadaan mitoitettua, kun tunnetaan planeettavaihteen välityssuhteet ja suurin sääto akseliin vaikuttava momentti. Polttomoottorin tuottama maksimimomentti on M_1 ja välityssuhde $i_{as} = -2,24$. Sähkömoottorin tuottama suurin momentti on M_2 ja välityssuhde $i_{mJ} = i_{bs}i_1^{-1} = i_{sb}^{-1}i_{bv}^{-1}$ jolloin saadaan laskettua jarrulle näkyvä momentti:

$$M_{JP} = i_{as}M_1 \quad (7)$$

$$M_{JM} = i_{sb}^{-1}i_{bv}^{-1}M_2 = \frac{M_2}{i_{sb}i_{bv}} \quad (8)$$

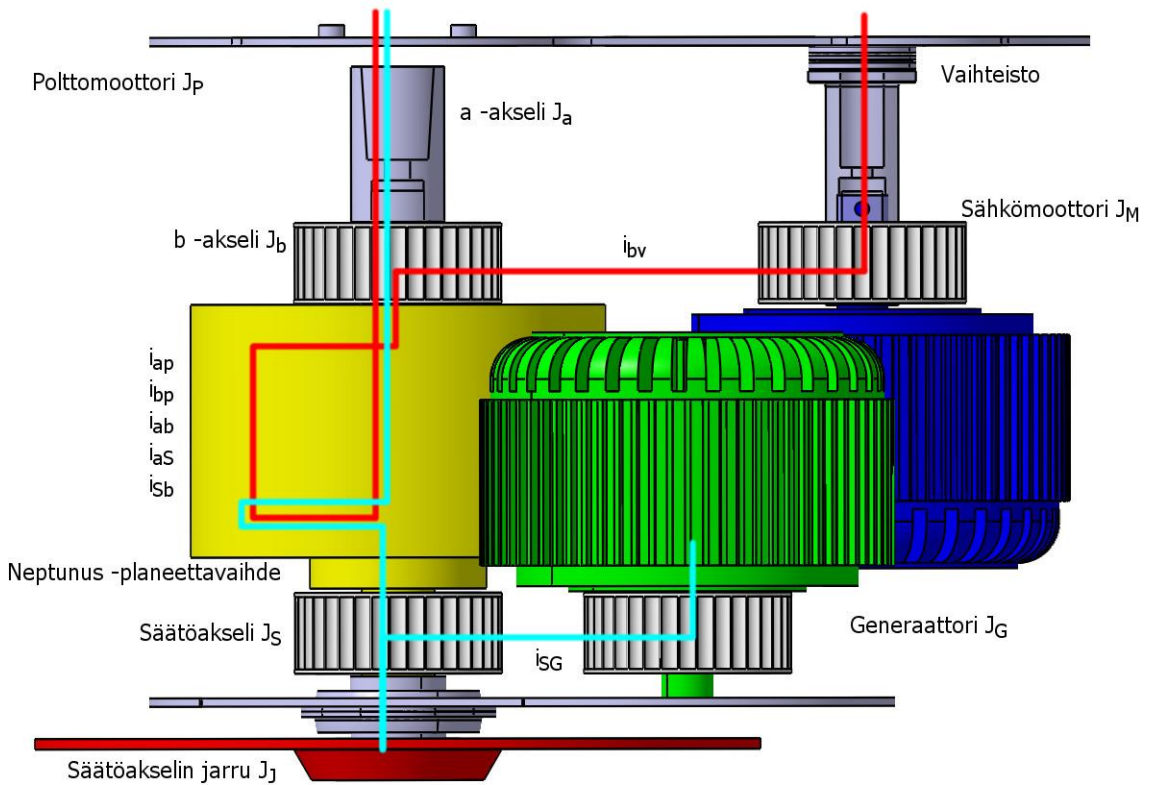
3.6 Vetoteho

Vetokyky kuvaa suureena ajoneuvon kykyä vetää ilmoitetulla massalla varustettua perävaunua. Esimerkkimme CAN-AM Outlander MAX –mönkijän ilmoitettu vetokyky on 590 kg. Tästä saadaan ajoneuvon vetoteho, kun tunnetaan ajoneuvoyhdistelmän massa m_{kok} ja voimansiirron hitausmassat huomioituna suurin mahdollinen kiihtyvyys a_{max} . Koska kitkahäviöt vedettävän perävaunun akselistossa ovat se vaikuttava tekijä, jonka voittaminen vaaditaan perävaunun liikkeelle saamiseksi, on tämän parametrin mitoitta-

minen mahdotonta ilman tarkempia tietoja perävaunusta. Jos ajoneuvon tarkemmat ominaisuudet (kiihtyvyys, CVT-vaihteiston toiminta) tunnettaisiin, voitaisiin ilmoitetun vetokyvyn pohjalta laskea perävaunun ominaisuudet ja käyttää näitä arvoja uuden vetokyvyn laskemiseen.

4 Hitausmassat ja välityssuhteet

Voimansiirto rakentuu useasta momenttia tuottavasta komponentista, joita ovat polttomoottori, generaattori, säätöakselin jarru ja sähkömoottori. Järjestelmän komponentit ja näiden väliset kytkennät havainnollistetaan kuvassa 7 ja tarkemmin liitteessä 1. Näille kaikille komponenteille selvitetään omat redusoidut hitausmassasysteemit.



Kuva 7. Neptunus-planeettavaihteen komponentit ja niiden sijoittelu esimerkkikokoonpanossa. Voimalinjan reitti polttomoottorilta vaihteistolle (kuvattu punaisella) ja polttomoottorilta generaattorille (kuvattu vaalean sinisellä).

Neptunus-planeettavaihteen kahden akselin väliset välityssuhteet saadaan selville hammasrattaiden hammaslukujen suhteista, ja ne ovat i_{ab} , i_{as} ja i_{sb} , kun kolmas akseli ei pyöri ($\omega = 0$). Esimerkkikokoonpanossa $i_{ab} = \frac{27}{15} \times \frac{27}{15} = 3,24$, $i_{as} = 1 - i_{ab} = -2,24$ ja $i_{sb} = \frac{i_{ab}}{i_{as}} = -1,446$. Momentit jakautuvat aina samojen kiinteiden välityssuhteiden mukaan, mutta akselien kierrostaajuudet vaikuttavat välityssuhteisiin nopeuksien jaossa ja täten myös tehon jaossa. Tähän pätee (2, s.18) yhtälö

$$3,24n_b - 2,24n_s - n_a = 0 \quad (9)$$

josta voidaan ratkaista kunkin akselin nopeus, kun tunnetaan kahden muun akselin nopeudet. Väliytssuhde momentille, kun kaikki akselit pyörivät, saadaan yhtälöstä

$$i'_{ab} = \frac{n_a - n_s}{n_b - n_s} \quad (10)$$

missä n_a on a-akselin kierrostaajuus,

n_b b-akselin kierrostaajuus ja

n_s S-akselin kierrostaajuus.

Tähän (10) sijoitettuna yhtälö 9 n_s :n suhteen ratkaistuna saadaan

$$i'_{ab} = \frac{n_a + \frac{1}{2,24}n_a - \frac{3,24}{2,24}n_b}{n_b + \frac{1}{2,24}n_a - \frac{3,24}{2,24}n_b} = \frac{\frac{3,24}{2,24}(n_a - n_b)}{\frac{1}{2,24}(n_a - n_b)} = 3,24 \quad (11)$$

Momentit siis jakautuvat aina kiinteiden väliytssuhteiden mukaan kierrostaajuuksista riippumatta.

Kuvassa 7 esitellyn mallin mukaan voidaan kirjoittaa redusoidut hitausmassat kaikille eri tilanteille. Polttomootorille näkyvä redusoitu hitausmassa vaihteiston nopealla vaihteella, kun jarru on kiinni saadaan yhtälöllä

$$J_{PH_{red}} = \frac{J_P}{1} + \frac{J_a}{1} + \frac{J_{pl}}{i_{ap}^2} + \frac{J_b}{i_{ab}^2} + \frac{J_m}{i_{ab}^2 i_{bv}^2} + \frac{J_{vaihtH1}}{i_{ab}^2 i_{bv}^2} + \frac{J_{vaihtH2}}{i_{ab}^2 i_{bv}^2 i_{vaihtH}^2} + \frac{J_{kulma1}}{i_{ab}^2 i_{bv}^2 i_{vaihtH}^2} + \frac{J_{kulma2}}{i_{ab}^2 i_{bv}^2 i_{vaihtH}^2 i_{kulma}^2} + \frac{J_{vet1}}{i_{ab}^2 i_{bv}^2 i_{vaihtH}^2 i_{kulma}^2} + \frac{J_{vet2}}{i_{ab}^2 i_{bv}^2 i_{vaihtH}^2 i_{kulma}^2 i_{vet}^2} + \frac{J_{pyörä}}{i_{ab}^2 i_{bv}^2 i_{vaihtH}^2 i_{kulma}^2 i_{vet}^2} \quad (12)$$

ja polttomootorille näkyvä redusoitu hitausmassa vaihteiston hitaalla vaihteella, kun jarru on kiinni puolestaan

$$J_{PL_{red}} = \frac{J_P}{1} + \frac{J_a}{1} + \frac{J_{pl}}{i_{ap}^2} + \frac{J_b}{i_{ab}^2} + \frac{J_m}{i_{ab}^2 i_{bv}^2} + \frac{J_{vaihtL1}}{i_{ab}^2 i_{bv}^2} + \frac{J_{vaihtL2}}{i_{ab}^2 i_{bv}^2 i_{vaihtL}^2} + \frac{J_{kulma1}}{i_{ab}^2 i_{bv}^2 i_{vaihtL}^2} + \frac{J_{kulma2}}{i_{ab}^2 i_{bv}^2 i_{vaihtL}^2 i_{kulma}^2} + \frac{J_{vet1}}{i_{ab}^2 i_{bv}^2 i_{vaihtL}^2 i_{kulma}^2} + \frac{J_{vet2}}{i_{ab}^2 i_{bv}^2 i_{vaihtL}^2 i_{kulma}^2 i_{vet}^2} + \frac{J_{pyörä}}{i_{ab}^2 i_{bv}^2 i_{vaihtL}^2 i_{kulma}^2 i_{vet}^2} \quad (13)$$

joissa J_P on polttomootorin hitausmomentti,

J_a a-akselin hitausmomentti,

J_{pl} planeettavaihteen planeettapyörien hitausmassa,
 J_b b-akselin hitausmassa,
 J_m sähkömoottorin hitausmassa,
 $J_{vaihtH1}$ vaihteiston nopean vaihteen käyttävän hammaspyörän hitausmassa,
 $J_{vaihtH2}$ vaihteiston nopean vaihteen käytettävän hammaspyörän hitausmassa,
 $J_{vaihtL1}$ vaihteiston hitaan vaihteen käyttävän hammaspyörän hitausmassa,
 $J_{vaihtL2}$ vaihteiston hitaan vaihteen käytettävän hammaspyörän hitausmassa,
 J_{kulma1} kulmavaihteen käyttävän hammaspyörän hitausmassa,
 J_{kulma2} kulmavaihteen käytettävän hammaspyörän hitausmassa,
 J_{vet1} vetopyörästön käyttävien hammaspyörien hitausmassa,
 J_{vet2} vetopyörästön käytettävien hammaspyörien hitausmassa,
 $J_{pyörä}$ ajoneuvon pyörien hitausmassa,
 i_{ap} a-akselin aurinkopyörän ja planeettapyörän välinen välityssuhde,
 i_{ab} a-akselin ja b-akselin välinen välityssuhde,
 i_{bv} b-akselin ja vaihteiston sisääntuloakselin välinen välityssuhde,
 i_{vaihtH} vaihteiston nopean vaihteen välityssuhde,
 i_{vaihtL} vaihteiston hitaan vaihteen välityssuhde,
 i_{kulma} kulmavaihteen välityssuhde ja
 i_{vet} vetopyörästön välityssuhde.

Polttomoottorille näkyvä redusoitu hitausmassa, kun jarru on auki ja käyttöjarru on päällä saadaan yhtälöllä

$$J_{red} = \frac{J_P}{1} + \frac{J_a}{1} + \frac{J_{pl}}{i_{ap}^2} + \frac{J_s}{i_{as}^2} + \frac{J_J}{i_{as}^2 i_J^2} + \frac{J_G}{i_{as}^2 i_{SG}^2} \quad (14)$$

missä J_s on S-akselin hitausmassa,
 J_J säätöakselin jarrun hitausmassa,
 J_G generaattorin hitausmassa,
 i_{as} a-akselin ja S-akselin välinen välityssuhde,
 i_J S-akselin ja jarrun välinen välityssuhde ja
 i_{SG} S-akselin ja generaattorin välinen välityssuhde.

Kun käyttöjarru ei ole päällä, saadaan polttomoottorille näkyväksi redusoiduksi hitausmassaksi nopealla vaihteella

$$J_{totPH_{red}} = J_{PH_{red}} + J_{red} - \frac{J_P}{1} - \frac{J_a}{1} - \frac{J_{pl}}{i_{ap}^2} \quad (15)$$

ja hitaalla vaihteella

$$J_{totPL_{red}} = J_{PL_{red}} + J_{red} - \frac{J_P}{1} - \frac{J_a}{1} - \frac{J_{pl}}{i_{ap}^2} \quad (16)$$

Sähkömoottorille näkyvä redusoitu hitausmassa nopealla vaihteella, kun jarru on auki (oletetaan a-akseli lukituksi) saadaan yhtälöllä

$$J_{totMH} = \frac{J_b}{i_{bv}^{-2}} + \frac{J_{pl}}{i_{bv}^{-2}i_{bp}^2} + \frac{J_S}{i_{bv}^{-2}i_{sb}^2} + \frac{J_J}{i_{bv}^{-2}i_{sb}^2} + \frac{J_G}{i_{bv}^{-2}i_{sb}^2i_{sg}^2} + \frac{J_{vaihtH1}}{1} + \frac{J_{vaihtH2}}{i_{vaihtH}^2} + \frac{J_{kulma1}}{i_{vaihtH}^2} + \frac{J_{kulma2}}{i_{vaihtH}^2i_{kulma}^2} + \frac{J_{vet1}}{i_{vaihtH}^2i_{kulma}^2} + \frac{J_{vet2}}{i_{vaihtH}^2i_{kulma}^2i_{vet}^2} + \frac{J_{pyörä}}{i_{vaihtH}^2i_{kulma}^2i_{vet}^2} \quad (17)$$

ja hitaalla vaihteella, kun jarru on auki

$$J_{totML} = \frac{J_b}{i_{bv}^{-2}} + \frac{J_{pl}}{i_{bv}^{-2}i_{bp}^2} + \frac{J_S}{i_{bv}^{-2}i_{sb}^2} + \frac{J_J}{i_{bv}^{-2}i_{sb}^2} + \frac{J_G}{i_{bv}^{-2}i_{sb}^2i_{sg}^2} + \frac{J_{vaihtL1}}{1} + \frac{J_{vaihtL2}}{i_{vaihtL}^2} + \frac{J_{kulma1}}{i_{vaihtL}^2} + \frac{J_{kulma2}}{i_{vaihtL}^2i_{kulma}^2} + \frac{J_{vet1}}{i_{vaihtL}^2i_{kulma}^2} + \frac{J_{vet2}}{i_{vaihtL}^2i_{kulma}^2i_{vet}^2} + \frac{J_{pyörä}}{i_{vaihtL}^2i_{kulma}^2i_{vet}^2} \quad (18)$$

joissa i_{bp} on b-akselin ja planeettapyörien välinen välityssuhde ja i_{sb} on S-akselin ja b-akselin välinen välityssuhde.

Sähkömoottorille näkyvä redusoitu hitausmassa nopealla vaihteella, kun jarru on kiinni saadaan yhtälöstä

$$J_{totMH2} = \frac{J_b}{i_{bv}^{-2}} + \frac{J_{pl}}{i_{bv}^{-2}i_{bp}^2} + \frac{J_a}{i_{bv}^{-2}i_{ab}^2} + \frac{J_P}{i_{bv}^{-2}i_{ab}^2} + \frac{J_{vaihtH1}}{1} + \frac{J_{vaihtH2}}{i_{vaihtH}^2} + \frac{J_{kulma1}}{i_{vaihtH}^2} + \frac{J_{kulma2}}{i_{vaihtH}^2i_{kulma}^2} + \frac{J_{vet1}}{i_{vaihtH}^2i_{kulma}^2} + \frac{J_{vet2}}{i_{vaihtH}^2i_{kulma}^2i_{vet}^2} + \frac{J_{pyörä}}{i_{vaihtH}^2i_{kulma}^2i_{vet}^2} \quad (19)$$

ja hitaalla vaihteella, kun jarru on kiinni

$$J_{totML2} = \frac{J_b}{i_{bv}^{-2}} + \frac{J_{pl}}{i_{bv}^{-2}i_{bp}^2} + \frac{J_a}{i_{bv}^{-2}i_{ab}^2} + \frac{J_P}{i_{bv}^{-2}i_{ab}^2} + \frac{J_{vaihtL1}}{1} + \frac{J_{vaihtL2}}{i_{vaihtL}^2} + \frac{J_{kulma1}}{i_{vaihtL}^2} + \frac{J_{kulma2}}{i_{vaihtL}^2i_{kulma}^2} + \frac{J_{vet1}}{i_{vaihtL}^2i_{kulma}^2} + \frac{J_{vet2}}{i_{vaihtL}^2i_{kulma}^2i_{vet}^2} + \frac{J_{pyörä}}{i_{vaihtL}^2i_{kulma}^2i_{vet}^2} \quad (20)$$

Generaattorille näkyvä redusoitu hitausmassa, kun käyttöjarru on päällä saadaan yhtälöstä

$$J_{Gred} = \frac{J_J}{i_{SG}^{-2}} + \frac{J_S}{i_{SG}^{-2}} + \frac{J_{pl}}{i_{SG}^{-2} i_{Sp}^2} + \frac{J_a}{i_{SG}^{-2} i_{aS}^{-2}} + \frac{J_P}{i_{SG}^{-2} i_{aS}^{-2}} \quad (21)$$

5 Simulointimalli ja saadut tulokset

Edellä mainittujen yhtälöiden avulla luotiin Excel-laskentapohja, jolla voidaan mitoittaa tarvittavan kokoinen generaattori ja sähkömoottori valmiiksi valituille välityksille ja halutuille kiihtyvyyksisarvoille tai tarvittavat välityssuhteet valmiiksi valitun generaattorin ja sähkömoottorin avulla haluttujen ominaisuuksin saavuttamiseksi. Simulointiin valittiin kaksi eri tapausta: alkuperäisen testikokoonpanon mukainen mönkijä ja paremmilla sähkömoottoreilla varustettu kokoonpano.

Paremmat sähkömoottorit valittiin ENSTROJ d.o.o –yrityksen valikoimasta ja ovat mallia EMRAX 207. Näiden moottoreiden suurin hetkellinen vääntömomentti on 160 Nm ja suurin hetkellinen teho 80 kW (4).

Alkuperäisen testikokoonpanon arvojoukko on seuraava:

$$M_P = 100 \text{ Nm},$$

$$M_G = 14 \text{ Nm},$$

$$M_M = 14 \text{ Nm},$$

$$J_P = 0,2 \text{ kgm}^2,$$

$$J_a = 0,01 \text{ kgm}^2,$$

$$J_{pl} = 0,01 \text{ kgm}^2,$$

$$J_b = 0,01 \text{ kgm}^2,$$

$$J_m = 0,02 \text{ kgm}^2,$$

$$J_{vaihtH1} = 0,01 \text{ kgm}^2,$$

$$J_{vaihtH2} = 0,01 \text{ kgm}^2,$$

$$J_{vaihtL1} = 0,01 \text{ kgm}^2,$$

$$J_{vaihtL2} = 0,01 \text{ kgm}^2,$$

$$J_{kulma1} = 0,01 \text{ kgm}^2,$$

$$J_{kulma2} = 0,01 \text{ kgm}^2,$$

$$J_{vet1} = 0,01 \text{ kgm}^2,$$

$$J_{vet2} = 0,01 \text{ kgm}^2,$$

$$J_{pyörä} = 0,01 \text{ kgm}^2,$$

$$J_S = 0,05 \text{ kgm}^2,$$

$$J_J = 0,1 \text{ kgm}^2,$$

$$J_G = 0,02 \text{ kgm}^2,$$

$$\begin{aligned}
i_{ap} &= 1,8, \\
i_{ab} &= 3,24, \\
i_{bv} &= 0,5, \\
i_{vaihtH} &= \frac{34}{29}, \\
i_{vaihtL} &= \frac{42}{20}, \\
i_{kulma} &= \frac{32}{13}, \\
i_{vet} &= \frac{36}{10}, \\
i_{aS} &= -2,24, \\
i_J &= 1, \\
i_{SG} &= \frac{14}{20}, \\
i_{bp} &= 0,56, \\
i_{sb} &= -1,45.
\end{aligned}$$

Paremmilla sähkömoottoreilla varustetussa kokoonpanossa edelliseen arvojoukkoon esitellään seuraavat muutokset:

$$\begin{aligned}
M_G &= 160 \text{ Nm}, \\
M_M &= 160 \text{ Nm}, \\
J_m &= 0,0256 \text{ kgm}^2, \\
J_G &= 0,0256 \text{ kgm}^2.
\end{aligned}$$

Saatujen tulosten pohjalta laskettiin yhtälön 1 kautta kiihtyvyysarvot molemmille tapauksille, esimerkkikokoonpanon moottoreilla $a_{max} = 0,412 \frac{m}{s^2} = 0,042 \text{ G}$ ja tehokkaammilla moottoreilla $a_{max} = 4,711 \frac{m}{s^2} = 0,480 \text{ G}$. Tämä tarkoittaa, että tilanteessa, jossa ilmanvastusta ja muita liikettä vastustavia voimia ei huomioida, kuluu ajoneuvolta 53,9 sekuntia nopeuden 80 km/h saavuttamiseksi esimerkkikokoonpanolla ja 4,7 sekuntia tehokkaammilla moottoreilla.

Yhtälön 3 kautta laskettiin generaattorin käyttämä aika säätöakselin nollanopeuteen saattamiseksi. Generaattorilla näkyvä momentti $\frac{M_P}{i_{SG}i_{aS}^{-1}}$ on paljon suurempi kuin mitä generaattori kykenee kummasakkaan tapauksessa tuottamaan, joten generaattori ei kykene yksin kyseisillä välityksillä pysäyttämään säätöakselia kaikissa tilanteissa.

Yhtälöiden 7 ja 8 avulla saatiin molemmissa tapauksissa suurimmaksi momentiksi 224 Nm polttomoottorin aikaansaamana. Tällä arvolla kyetään mitoittamaan halutun lainen jarru säätöakselille. Esimerkkikokoonpanon ajoneuvokäyttöön tarkoitettu levyjarru on ominaisuuksiltaan riittävä tähän tarkoitukseen.

6 Yhteenveto

Tässä työssä luotiin pohja Neptunus-planeettavaihteen omaavan hybridimuunnoksen hitausmassojen ja täten todennäköisempien kiihtyvyyssarvojen selvittämiseksi. Tätä varten luotua Excel-laskentapohjaa voidaan myös hyödyntää jatkossa vastaavanlaisten hybridikokoonpanojen mitoittamiseen.

Työssä saatiin selville, kuinka voimansiirron komponenttien hitausmassat vaikuttavat ajoneuvon kiihtyvyyteen ja tätä kautta tarvittavan vääntöreservin määrään haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi. Alkuperäiseen testikokoonpanoon valitut sähkömoottorit ovat tämän työn perusteella varsin alimitoitettuja luontevia kiihtyvyyssarvoja tavoiteltaessa, ja tämä tuli todettua myös käytännössä.

Työn pohjana olevan projektin jatkoon kannalta hyödyllisiä yksityiskohtia on kuitenkin vähän. Mekaanisen vaihteiston poistaminen ja peruutusvaihteen lisääminen generaattorin ja sähkömoottorin tehtäväksi lisäävät usean ongelmakohdan Neptunus-planeettavaihteen momentin ja tehon jaolle. Excel-laskentapohjan muuttaminen erilaisen voimalinjan tarkoituksiin on varsin yksinkertainen prosessi, mutta monen muuttujan summan muuttamisessa tulee olla erityisen huolellinen. Erillisen oikean sovelluksen ohjelmointi tämän voimalinjan mitoittamiseen ja mahdollisten muutosten huomioimiseen voisi olla jatkoon kannalta mitä mainioin vaihtoehto.

Lähteet

- 1 Airila, Mauri, Ekman, Kalevi, Hautala, Pekka, Kivioja, Seppo, Kleimola, Matti, Martikka, Heikki, Miettinen, Juha, Niemi, Erkki, Ranta, Aarno, Rinkinen, Jari, Salonen, Pekka, Verho, Arto, Vilenius, Matti & Välimaa, Veikko. 2010. Koneenosien suunnittelu. Helsinki: WSOY.
- 2 Salminen, Pauli. 2007. Portaattoman voimansiirtojärjestelmän kehittäminen. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu.
- 3 GOLDEN MOTOR Motor test curve. 2013. Verkkodokumentti. Golden Motor Technology Co Ltd. <<http://www.goldenmotor.com/eCar/HPM48-5000Curve.pdf>>. Luettu 1.4.2015.
- 4 EMRAX 207 Technical Data Table. 2014. Verkkodokumentti. ENSTROJ d.o.o. <http://enstroj.si/images/stories/emrax_207_tech_data_table_dec_2014.pdf>. Luettu 1.4.2015.

Voimalinjan kytkentäkaavio

